

高原鼢鼠越冬食物选择与营养成分的关系

崔雪峰^{1 2} 谢久祥^{1 2} 张守栋^{1 2} 林恭华¹ 张同作¹ 苏建平^{1*}

(1 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001) (2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解高原鼢鼠在越冬期的食物选择与营养成分之间的关系, 采集了 67 个高原鼢鼠的冬季粮仓及环境样方, 分析高原鼢鼠对每一种植物的选择指数, 将其分成 3 种食物类型: 喜食、可变和不喜食。通过测定每一种植物的粗蛋白、粗纤维、水溶性糖和粗灰分的含量, 比较分析了营养成分含量在 3 种食物类型间的差异, 及其与各种植物选择指数的相关关系。结果显示, 高原鼢鼠储存的食物种类多达 67 种, 本文选取含量较高且样本量大于 5 的 39 种植物 (占粮仓和样方总生物量的 99% 以上, 其中喜食 12 种、可变 16 种、不喜食 11 种) 进行分析。在 3 种食物类型之间, 粗蛋白、粗纤维和水溶性糖含量均有极显著差异 ($P < 0.001$), 粗灰分含量则无明显差异 ($P = 0.800$)。喜食和可变类型的粗蛋白和水溶性糖含量显著高于不喜食类型 ($P < 0.01$); 喜食和可变类型的粗纤维含量则显著低于不喜食类型 ($P < 0.01$); 喜食和可变类型之间这 3 个指标差异都不显著 ($P > 0.05$)。Spearman 相关分析显示, 粗蛋白 ($R = 0.547, P < 0.001$) 和水溶性糖 ($R = 0.617, P < 0.001$) 含量与选择指数显著正相关, 粗纤维与选择指数显著负相关 ($R = -0.707, P < 0.001$), 粗灰分与选择指数则无显著相关关系 ($R = 0.032, P = 0.846$)。结果表明, 高原鼢鼠总体上偏好粗蛋白和水溶性糖含量高、粗纤维含量低的植物, 对无机盐的含量则不敏感。

关键词: 高原鼢鼠; 营养成分; 粮仓; 选择指数

中图分类号: Q958

文献标识码: A

文章编号: 1000-1050 (2014) 04-0340-08

Relationship between overwintering preference and nutritional content of the foods of plateau zokor (*Eospalax baileyi*)

CUI Xuefeng^{1 2}, XIE Jiuxiang^{1 2}, ZHANG Shoudong^{1 2}, LIN Gonghua¹, ZHANG Tongzuo¹, SU Jianping^{1*}

(1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the current paper we sampled plants from winter caches and nearby vicinities of 67 burrow systems of the plateau zokor (*Eospalax baileyi*). We then calculated the electivity index (EI) of each of the food items based on their relative biomass and divided them into three preference types based on the 95% confidence limit of the mean EI with bootstrap methods: (1) preferred: 95% confidence lower limit > 0 ; (2) changeable: 95% confidence lower limit ≤ 0 and 95% confidence upper limit ≥ 0 ; and (3) rejected: 95% confidence upper limit < 0 . Subsequently, we measured the content of crude protein, crude fiber, crude water-soluble sugars, and crude ash of these food items and then compared them among the three preference types and further tested the correlations between the mean EI and each of these content levels. A total of 67 food items were identified from the caches, of which 39 (preferred, 12 items; changeable, 16 items; rejected, 11 items) were found in more than five burrowing systems, constituting over 99% of the total biomass that we sampled. The contents of crude protein, crude fiber, and crude water-soluble sugars (but not crude ash) differed significantly among the three types ($P < 0.001$). The preferred and changeable types had significantly higher contents of crude protein and crude water-soluble sugars than the rejected types ($P < 0.01$). Furthermore, the preferred and changeable types were found to have a significantly lower content of crude fiber as compared to the rejected types ($P < 0.01$). However, the three content levels were not significantly different between the preferred and changeable types ($P > 0.05$). Spearman correlation showed that the contents of crude protein ($R = 0.547, P < 0.001$) and crude water-soluble sugars ($R = 0.617, P < 0.001$) both were significantly and positively correlated with EI while the content of crude fiber was significantly and nega-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31372197); 青海省科技支撑计划项目 (2014-NS-113)

作者简介: 崔雪峰 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事动物生态学研究.

收稿日期: 2013-12-01; 修回日期: 2014-05-06

* 通讯作者, Corresponding author, E-mail: jpsu@nwipb.ac.cn

tively correlated ($R = -0.707$, $P < 0.001$). The content of crude ash was not significantly correlated with EI ($R = 0.032$, $P = 0.846$). Taken together, our results indicate that plateau zokor prefer food items containing higher levels of protein, more water-soluble sugars, and less fiber, but are apparently not sensitive to mineral content.

Key words: Cache; Electivity index; Nutritional content; Plateat zokor (*Eospalax baileyi*)

所有动物都要觅食, 但任何动物都不可能均等地利用环境中可能出现的所有食物种类。通常, 它们只对其中的少部分食物种类表现出明显的偏好, 而对大多数食物种类很少取食甚至完全拒食, 这种现象被称为食物选择或选择性觅食 (Hughes and Croy, 1993)。选择性觅食的意义在于: 既可确保能量和营养物质的高效摄入, 又能同时避免摄入或化解对机体有毒有害的物质, 从而使觅食者适合度最大化 (Moss, 1991; Rogers and Blundell, 1991)。影响动物食物选择的因素十分复杂, Perry 和 Pianka (1997) 对过去 30 年觅食生态学的研究分析后认为, 外部因素 (如食物可利用性、捕食风险、竞争、食物营养价值和有毒成分等) 和内部因素 (如习得经验、个体发生中的食性改变、遗传特征等) 以及系统发生过程中获得的感官辨识能力、形态特征、生理能力和行为对策等均对动物觅食行为产生不同程度的影响, 其中大多数直接与食物选择相关。因此, 研究这些因素对食物选择的作用机制不仅有助于阐明觅食动物本身的进化与适应, 而且还能加深对觅食者—被觅食者种间关系与协同进化机制的理解。

20 世纪 80 年代以来, 生态学家就植食性哺乳动物的食物选择进行了大量的研究, 涉及众多的研究对象和研究方法, 也提出了许多理论模型或假说, 主要包括: 营养假说 (Nutritional hypothesis) (Nolte and Provenza, 1992)、植物次生化合物假说 (Plant secondary compounds hypothesis) (Freeland and Janzen, 1974)、营养平衡假说 (Nutrient balance hypothesis) (Pehrson and Lindlöf, 1984)、最优觅食理论 (Optimal foraging theory) (Pyke, 1977, 1984)、条件性气味回避假说 (Conditioned flavor aversion hypothesis) (Provenza *et al.*, 1996; 李俊年和刘季科, 2003) 等。其中, 营养假说认为, 植食性动物的食物选择受植物营养成分含量的控制, 通过各自特殊的取食策略, 达到营养物和能量摄入最大化 (Nolte and Provenza, 1992; Secombe-Hett and Turkington, 2008)。大量的研究证实, 草食动物喜食蛋白质含量丰富和能量高的植物

(Lindlöf *et al.*, 1974; Harju and Hakkarainen, 1997; Provenza *et al.*, 2003; Wang and Chen, 2012)。然而这也并不绝对, 例如, 白靴兔 (*Lepus americanus*) 喜食蛋白质含量相对较低而纤维素含量较高的植物 (Hodges and Sinclair, 2003)。此外, 即便在同一生境中, 不同动物的食物选择及其与营养物质含量的关系也可能因其不同的生物学属性而产生分化 (Jenkins and Ascanio, 1993)。因此, 草食动物食物选择规律及其与营养物质含量的关系问题远未得到解决。

地下鼠指大部分时间生活在地面之下, 并且已经适应了地下环境的一类特殊的啮齿动物 (Lacey *et al.*, 2000)。全世界大约有 250 种, 隶属于 6 科 38 属, 除大洋洲和南极洲之外的所有大陆都有广泛分布 (Begall *et al.*, 2007)。由于其特殊的生活方式, 地下鼠已经成为国内外动物学和生态学领域的重要研究对象 (Nevo, 1999; Begall *et al.*, 2007; 林恭华, 2010)。然而, 由于观察难度大等原因, 目前关于地下鼠食物选择与营养物质含量的研究鲜见报道。高原鼯鼠 (*Eospalax baileyi*) 是一种完全独居的典型地下鼠, 栖息于海拔 2 600 - 4 600 m 的青藏高原 (樊乃昌和施银柱, 1982; 周文扬和窦丰满, 1990)。高原鼯鼠 85% - 90% 的时间都在地下活动, 繁殖与取食活动均在地下进行, 取食活动主要发生在距地表 3 - 20 cm 的地下, 主要以杂类草与苔草 (*Carex sp.*) 的根茎为食 (王权业等, 2000; Zhang *et al.*, 2003)。高原鼯鼠是食物泛化者, 所采食的植物种类特别广泛, 达到近百种 (王权业等, 2000; Xie *et al.*, 2013)。每年 10 月至次年 5 月是青藏高原的冬季, 由于冻土层厚达 1 m 以上, 高原鼯鼠的挖掘取食活动不得不停止。为了度过漫长的冬季, 每年 9 月底到 10 月初, 高原鼯鼠开始营建粮仓、搜寻与储存越冬食物 (苏建平和刘季科, 2000)。通过发掘和分析其粮仓中的食物组成, 为我们研究其食物选择提供可靠的基础。本文通过比较高原鼯鼠粮仓及洞道周围的植物组成, 分析其对每种植物的选择指数, 在此基础上, 通过测定植物的主要营养成分来分析高原鼯

鼠的食物选择与其营养成分的关系,并验证食物选择“营养假说”。由于研究对象的特殊性,我们的分析可以为草食动物的食物选择研究提供重要的数据支持。

1 研究方法

1.1 植物收集与处理

2012年10月在青海省大通县新庄镇(北纬 $37^{\circ}06'$,东经 $101^{\circ}36'$,海拔3100 m)采集67只高原鼯鼠个体的洞道粮仓,每个洞道系统的粮仓个数不定,根据位置不同可将其分为老窝两侧的主巢粮仓(距地面1.5 m以下)和靠近地表的临时粮仓(距地面0.5 m以上)两大类(樊乃昌和谷守勤,1981)。主巢粮仓储藏的食物时间跨度长,不能反映高原鼯鼠即时的食物选择,而临时粮仓贮存的食物均为当年9月中旬至10月中旬的新鲜植物,这些食物可反映高原鼯鼠越冬期的食物组成。每个洞道均有1-3个临时粮仓,将每个洞道系统的临时粮仓合并,代表1只高原鼯鼠的食物组成;同时,在每个临时粮仓洞道0.5 m范围内随机选取3个 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的样方,代表对应高原鼯鼠的环境食物组成。将粮仓和样方中的植物全部带回实验室分类后,用干燥烘箱 60°C 烘干至恒重。由于高原鼯鼠主要取食植物地下部分,尽管有些物种夹杂地上部分,但多数处于秋季干枯状态,为保持数据处理的一致性,剪取每种植物的地下部分,称量干重用以分析高原鼯鼠对每种植物的选择指数。最后,将这些植物地下部分用高速粉碎机粉碎并封装保存,用来测定其营养成分。

1.2 营养成分测定

本实验选用全自动定氮仪(Foss Kjeltac 8400),凯氏定氮法测定粗蛋白含量。利用粗纤维测定仪(华焯SLQ-6)进行消化,过滤法测定粗纤维含量。水溶性糖含量测定采用改良的苯酚-硫酸法(Dubois *et al.*, 1956),即用Sevag试剂(氯仿:正丁醇=5:1)(Qin *et al.*, 2002)反复去除蛋白质后再进行显色反应。粗灰分含量测定采用马弗炉灼烧法。所有的含量测定实验均重复3次。

1.3 统计分析

1.3.1 食物选择指数分析

由于选择指数(Selection index, *SI*)(Savage, 1931): $SI = R/P$ (*R*和*P*分别为某种植物在粮仓

和样方中的相对生物量)取值范围过大,不便于比较不同条件下动物对同种食物的偏好程度,因此选择计算高原鼯鼠对每一种植物的Ivlev选择指数(Electivity index, *EI*)(Ivlev, 1961): $EI = (c_i - v_i) / (c_i + v_i)$,其中 c_i 和 v_i 分别为第*i*种植物在粮仓和样方中的相对生物量,*EI*取值在-1-+1范围内,其意义分别为:-1 $\leq EI < 0$ 表示负选择, $EI = 0$ 表示无选择随机取食, $0 < EI \leq 1$ 为正选择。依据所有洞道*EI*数据,使用SPSS 19.0统计软件包中的Bootstrap模块,计算每种植物*EI*值的均值和95%上下置信限,重复抽样次数为1000次。如果某种食物的选择指数95%下限 > 0 ,则该食物为喜食类型;相反,如果某种食物的选择指数95%上限 < 0 ,则该食物为不喜食类型;而当某种食物的选择指数95%上限 ≥ 0 且95%下限 ≤ 0 ,则该食物被认为是可变类型。

1.3.2 营养成分差异分析

首先使用Shapiro-Wilk(*W*检验)分析各参数的正态性,结果显示,粗蛋白含量符合正态分布,而水溶性糖含量、粗纤维含量、粗灰分含量以及平均选择指数都不符合正态分布。因此,对于粗蛋白含量的组间比较,用方差分析的方法进行检验。首先用单因素方差分析检验3种食物类型之间粗蛋白含量有无显著差异,如有,则进一步用LSD法进行两两组间的比较。对于水溶性糖含量、粗纤维含量、粗灰分含量的组间差异,则用非参数检验的方法进行。先用多个独立样本的非参数检验(Kruskal Wallis Test)分析它们在3种食物类型间是否存在显著差异,如有,则用两个独立样本的非参数检验(Mann-Whitney Test)比较两两食物类型之间的差异性。对于各营养物质含量之间及其与选择指数之间的相关性,由于不存在双变量都符合正态分布的情况,我们统一用非参数的Spearman相关分析进行检验。所有分析过程在SPSS 19.0统计软件包中进行。

2 结果

2.1 食物组成及喜食类型

在粮仓和样方中共得到82种(少数用属、科表示)植物,隶属于31科64属,其中,高原鼯鼠储存的食物种类67种,隶属27科51属,每个洞道系统粮仓的食物种类5-27种不等,样方中的植

物种类 6–31 种不等。高原鼢鼠储藏的食物虽然种类很多, 但生物量主要集中在少数几种植物。按粮仓中储藏生物量从大到小排序, 前 7 种植物生物量之和占总储藏生物量的 91.4%, 其中珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、苣荬菜 (*Sonchus arvensis*)、甘青老鹳草 (*Geranium pylzowianum*) 4 种植物就分别占粮仓总生物量的 24.5%、23.1%、21.8%、11.7%。多年生杂类草是高原鼢鼠储藏的最主要的食物种类, 粮仓中的前 7 种植物中, 除禾本科外, 均为多年生

杂类草。

根据高原鼢鼠对植物的选择指数分析, 选取在样方和粮仓中含量较高且样本量 (在某个洞道系统中, 在样方或粮仓中至少一处含有这种植物的记为一个有效样本) ≥ 5 的 39 种植物 (占样方和粮仓生物量的 99% 以上), 将它们分为 3 类: 喜食、可变和不喜食 (分别包括 12、16 和 11 种植物), 即其选择指数 95% 下限 > 0 为喜食类型, 95% 上限 < 0 为不喜食类型, 其余的为可变类型 (表 1)。

表 1 39 种植物在粮仓和环境中的生物量 (%)、平均选择指数和 95% 置信上下限及喜食分类

Table 1 Biomass(%), mean electivity index(EI), 95% confidence lower/upper limit and preference type of the 39 plant species in caches and vicinities

植物种 Species	样本量 Sample size	生物量百分比 Biomass (%)		选择指数 EI			喜食类别 Preference type
		粮仓 Cache	样方 Vicinity	均值 Mean value	下限 Lower limit	上限 Upper limit	
珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	29	24.506	4.530	0.31	0.01	0.57	1
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	60	23.142	5.420	0.29	0.10	0.44	1
苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i>	46	21.750	1.410	0.49	0.29	0.68	1
甘青老鹳草 <i>Geranium pylzowianum</i>	61	11.735	0.640	0.37	0.17	0.55	1
问荆 <i>Equisetum arvense</i>	62	3.803	0.408	0.36	0.16	0.53	1
甘露子 <i>Stachys sieboldi</i>	18	2.262	0.138	0.59	0.29	0.83	1
雪白委陵菜 <i>Potentilla nivea</i>	27	1.550	0.468	0.46	0.20	0.70	1
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	31	1.468	0.689	0.31	0.07	0.53	1
高原毛茛 <i>Ranunculus tanguticus</i>	29	0.206	0.031	0.61	0.37	0.85	1
阿拉善马先蒿 <i>Pedicularis alaschanica</i>	24	0.092	0.021	0.42	0.06	0.73	1
肉果草 <i>Lancea tibetica</i>	24	0.080	0.036	0.36	0.03	0.69	1
西藏堇菜 <i>Viola kunawarensis</i>	10	0.063	0.000	0.93	0.78	1.00	1
蒲公英 <i>Taraxacum</i> sp.	36	0.835	0.202	0.25	-0.05	0.53	2
粘毛鼠尾草 <i>Salvia roborowskii</i>	28	0.698	0.155	0.04	-0.31	0.37	2
小蓟 <i>Cirsium setosum</i>	36	0.465	0.673	-0.22	-0.49	0.04	2
大蓟 <i>Cirsium japonicum</i>	15	0.331	0.653	-0.27	-0.72	0.23	2
田葛缕子 <i>Carum buriaticum</i>	10	0.300	0.171	0.10	-0.49	0.74	2
草玉梅 <i>Anemone rivularis</i>	12	0.253	0.034	-0.08	-0.66	0.53	2
平车前 <i>Plantago depressa</i>	42	0.248	0.134	0.14	-0.13	0.41	2
高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>	12	0.166	0.065	0.19	-0.37	0.68	2
迭裂银莲花 <i>Anemone imbricata</i>	16	0.101	0.025	-0.05	-0.55	0.42	2

续表 1 Continued from table 1

植物种 Species	样本量 Sample size	生物量百分比 Biomass (%)		选择指数 EI			喜食类别 Preference type
		粮仓 Cache	样方 Vicinity	均值 Mean value	下限 Lower limit	上限 Upper limit	
		草原老鹳草 <i>Geranium pratense</i>	18	0.092	0.031	0.14	
线叶龙胆 <i>Gentiana farreri</i>	8	0.089	0.045	-0.28	-0.84	0.33	2
矮蒿草 <i>Kobresia humilis</i>	11	0.070	0.458	-0.47	-0.96	0.06	2
异叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia diversifolia</i>	12	0.050	0.180	0.19	-0.35	0.67	2
独花黄精 <i>Polygonatum hookeri</i>	6	0.037	0.036	-0.04	-0.85	0.73	2
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	5	0.020	0.091	-0.42	-1.00	0.46	2
花苜蓿 <i>Trigonella ruthenica</i>	7	0.002	0.004	-0.43	-1.00	0.33	2
禾本科 Gramineae	69	4.185	65.558	-0.85	-0.89	-0.80	3
苔草 <i>Carex</i> sp.	30	0.396	11.086	-0.73	-0.85	-0.56	3
大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	48	0.232	2.156	-0.55	-0.73	-0.34	3
青蒿 <i>Artemisia annua</i>	22	0.066	0.674	-0.39	-0.71	-0.05	3
隐瓣山莓草 <i>Sibbaldia aphanopetala</i>	10	0.064	0.285	-0.88	-1.00	-0.67	3
灰藜 <i>Chenopodium album</i>	19	0.062	0.128	-0.82	-0.99	-0.57	3
金露梅 <i>Potentilla fruticosa</i>	21	0.016	1.273	-0.95	-1.00	-0.89	3
二柱头蕪草 <i>Sciepus distigmaticus</i>	13	0.012	0.119	-0.71	-1.00	-0.33	3
矮小火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	23	0.002	0.276	-0.93	-1.00	-0.78	3
臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	20	0.001	0.916	-1.00	-1.00	-1.00	3
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	6	0	0.014	-0.71	-1.00	-0.13	3

1: 喜食; 2: 可变; 3: 不喜食

1: Preferred; 2: Changeable; 3: Rejected

2.2 营养成分在 3 种食物类型间的差异

测定上述 39 种植物的粗蛋白、粗纤维、水溶性糖和粗灰分 4 个指标 (表 2)。结果显示, 在喜食、可变和不喜食 3 个水平间粗蛋白含量差异极显著 ($P < 0.001$), 多重比较后显示喜食与可变之间差异不显著 ($P = 0.074$), 而喜食和可变两种食物类型的粗蛋白含量显著高于不喜食食物 ($P < 0.01$)。在 3 类食物类型间, 水溶性糖的含量有极显著差异, 两两比较结果显示, 在喜食和可变两种类型之间的含量差异不明显 ($P = 0.710$), 但都极显著高于不喜食类型 ($P < 0.01$)。粗纤维含量在 3 种食物类型之间差异极显著, 在喜食和可变类型之间无显著差别 ($P = 0.164$), 但不喜食类型

的粗纤维含量显著高于前两种食物类型 ($P < 0.01$)。粗灰分含量在 3 种食物类型间无显著差异 ($P = 0.800$)。各参数的均值、方差和统计检验信息在表 2 中列出。

2.3 营养成分与平均选择指数的相关性

相关性分析表明, 平均选择指数与粗蛋白和水溶性糖都存在极显著的 ($P < 0.001$) 正相关关系, 而与粗纤维有着极显著的 ($P < 0.001$) 负相关关系, 与粗灰分之间没有显著的相关关系 ($P = 0.846$)。此外, 粗纤维与粗蛋白、粗纤维与水溶性糖均存在极显著的 ($P < 0.01$) 负相关关系, 而粗蛋白和水溶性糖之间有显著的 ($P < 0.001$) 正相关关系 (表 3)。

表2 3种食物类型的营养成分含量(平均值±方差,%)及其差异
Table 2 Nutritional contents (Mean ±SD, %) and difference in three food types

	食物类型 Food type			统计量 Statistics
	喜食 Preferred	可变 Changeable	不喜食 Rejected	
粗蛋白 CP	9.61 ± 3.46 ^a	11.81 ± 3.42 ^a	5.74 ± 2.15 ^b	$F = 12.269, df = 2, P < 0.001$
粗纤维 CF	12.28 ± 7.87 ^a	17.19 ± 10.69 ^a	40.49 ± 10.89 ^b	$\chi^2 = 22.016, df = 2, P < 0.001$
水溶性糖 CWSS	31.25 ± 20.03 ^a	30.63 ± 17.70 ^a	5.84 ± 4.37 ^b	$\chi^2 = 16.972, df = 2, P < 0.001$
粗灰分 CA	6.34 ± 3.51	5.70 ± 2.24	5.97 ± 2.34	$\chi^2 = 0.447, df = 2, P = 0.800$

上标字母相同表示每一行两两组间差异不显著 $P > 0.05$, 不同则表示两两组间差异极显著 $P < 0.01$

The same superscript letters mean not significant ($P > 0.05$) between two types of each row, different super scripts mean significant difference ($P < 0.01$). CP: Crude protein; CF: Crude fiber; CWSS: Crude water-soluble sugars; CA: Crude ash

表3 平均选择指数与营养成分含量的相关关系
Table 3 Correlations between mean electivity index (EI) and nutritional contents

	平均选择指数 EI	粗蛋白 CP	粗纤维 CF	水溶性糖 CWSS	粗灰分 CA
平均选择指数 EI	—	0	0	0	0.846
粗蛋白 CP	0.547	—	0.003	0.001	0.922
粗纤维 CF	-0.707	-0.458	—	0	0.211
水溶性糖 CWSS	0.617	0.526	-0.869	—	0.155
粗灰分 CA	0.032	0.016	0.205	-0.232	—

下三角表示 Spearman 相关系数, 上三角表示 P 值

The lower triangle shows Spearman correlation coefficient, and the upper triangle shows P values. CP: Crude protein; CF: Crude fiber; CWSS: Crude water-soluble sugars; CA: Crude ash

3 讨论

本文结果表明,在越冬期高原鼯鼠喜食的食物具有粗蛋白和水溶性糖含量高、粗纤维含量低的特点。蛋白质是生命的物质基础,在参与有机体生命活动过程中具有决定性的作用。食物蛋白质含量过低会严重影响动物的生存状态,如体重下降、免疫受损(唐祖明等,1993),对子代发育也会造成不可逆的损伤(施明等,1997)。如前所述,动物往往偏好蛋白质含量高的食物,而高原鼯鼠在有限的植物资源中同样优先选择蛋白质含量较高的食物来保证机体的正常运转。尽管有研究显示,部分物种如白靴兔(Hodges and Sinclair, 2003)、白尾鹿(*Odocoileus virginianus*) (Berteaux *et al.*, 1998)等对蛋白质的偏好低于纤维素或能量需求,然而这类动物的肠道细菌的发酵功能非常发达,微生物产生的蛋白质可能可以为宿主提供足够的氨基酸来源。

糖类是另一类非常重要的有机化合物,它不但是一切生命体维持生命活动所需能量的主要来源,

还作为生物体的结构成分和信号分子存在(王镜岩,2002)。高原鼯鼠在地下的挖掘活动需要消耗很多能量,水溶性糖作为可直接利用的能量物质无疑是最好的选择。

盲肠(后肠)发达的动物在一定程度上可以利用一部分纤维素(Hume, 2002),纤维素降解后和水溶性糖一样可以提供能量。高原鼯鼠也具有较发达的盲肠(杨传华等,2012),但本研究结果表明高原鼯鼠对纤维素含量高的植物显著负选择。一个可能的解释是,高原鼯鼠对纤维素的利用不如蛋白质和糖那样直接和高效,而且纤维素含量高的食物口感不好。此外,本研究还显示,蛋白质和水溶性糖的含量与纤维素含量呈显著负相关关系,纤维素含量高就意味着蛋白质和水溶性糖的含量低。因此推测,高原鼯鼠不喜食纤维素含量高的食物,可能与纤维素挤占了蛋白质和水溶性糖的比例有关。

粗灰分是一类各种固体氧化物和无机盐的混合物,包含许多重要的金属元素,如钠、钙、镁等,在机体代谢中是不可或缺的。Lindlöf等(1974, 1978)发现,雪兔(*Lepus timidus*)对磷和钙含量

高的食物有偏好, 而 Belovsky (1984) 则发现白靴兔喜食钠含量高的食物。张颖俊等 (2013) 发现黑白仰鼻猴 (*Rhinopithecus bieti*) 偏好高磷、低钙/磷比 (Ca/P) 和低钙的食物。从本研究的结果来看, 粗灰分在 3 个食物类型上并没有显著差别, 与选择指数也没有相关关系。可能是高原鼢鼠取食的食物绝大部分是从土中挖出的植物根系, 其表层含有大量的泥土, 尽管高原鼢鼠进化出了可用来刮土的片状且有凹槽的拇指指甲 (Lin *et al.*, 2011), 但是并不能将其完全除净。我们推测, 高原鼢鼠在进食的过程中被迫从泥土中摄取一定量的无机矿物质, 减少了其从植物中对矿质元素的依赖。

本研究表明, 高原鼢鼠的食物选择主要受蛋白质和水溶性糖的制约, 这样的结果符合营养假说。有趣的是, 各种营养成分在喜食和可变两种食物之间都未体现出显著差别, 以目前的数据还无法判定其原因。值得一提的是, 除营养物质外, 还有许多其他因素影响高原鼢鼠的食物选择。张堰铭 (2000) 的研究发现, 食物中添加萜类物质, 可使高原鼢鼠取食量下降、消化率上升; 而 Lin 等 (2012) 的研究则显示, 食物中添加单宁酸, 高原鼢鼠的取食量反而增加, 消化率则下降。这就意味着, 食物中的次生化合物可能对高原鼢鼠的食物偏好有潜在影响。我们下一步将测定各种植物的主要次生化合物 (萜类、单宁、生物碱等) 含量, 以对高原鼢鼠的食物选择机制做更进一步了解。

参考文献:

- Begall S, Burda H, Schleich C E. 2007. Subterranean Rodents: News from Underground. Berlin: Springer, 3-9.
- Belovsky G E. 1984. Snowshoe hare optimal foraging and its implications for population dynamics. *Theoretical Population Biology*, **25** (3): 235-264.
- Berteaux D, Crête M, Huot J, Maltais J, Ouellet J P. 1998. Food choice by white-tailed deer in relation to protein and energy content of the diet: a field experiment. *Oecologia*, **115** (1-2): 84-92.
- Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, Rebers P T, Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, **28** (3): 350-356.
- Fan N C, Gu S Q. 1981. The structure of the tunnel system of the chinese zoker. *Acta Theriologica Sinica*, **1** (1): 67-71. (in Chinese)
- Fan N C, Shi Y Z. 1982. A revision of the zokors of subgenus *Eospalax*. *Acta Theriologica Sinica*, **2** (2): 183-196. (in Chinese)
- Freeland W J, Janzen D H. 1974. Strategies in herbivory by mammals: the role of plant secondary compounds. *American Naturalist*, **108** (961): 269-289.
- Harju A, Hakkarainen O. 1997. Effect of protein and birch-bark powder on selection of food by root voles (*Microtus oeconomus*). *Journal of Mammalogy*, **78** (2): 563-568.
- Hodges K E, Sinclair A R. 2003. Does predation risk cause snowshoe hares to modify their diets? *Canadian Journal of Zoology*, **81** (12): 1973-1985.
- Hughes R N, Croy M I. 1993. An experimental analysis of frequency-dependent predation (switching) in the 15-spined stickleback, *Spinachia spinachia*. *Journal of Animal Ecology*, **62** (2): 341-352.
- Hume I D. 2002. Digestive strategies of mammals. *Acta Zoologica Sinica*, **48** (1): 1-19.
- Ivlev V S. 1961. Experimental Ecology of the Feeding of Fishes. New Haven: Yale University Press.
- Jenkins S H, Ascanio R. 1993. A potential nutritional basis for resource partitioning by desert rodents. *American Midland Naturalist*, **130** (1): 164-172.
- Lacey E A, Patton J, Cameron G. 2000. Life Underground: The Biology of Subterranean Rodents. Chicago: University of Chicago Press, 1-10.
- Li J N, Liu J K. 2003. Ecological implication and behavior mechanism of food selection of mammalian herbivores. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **14** (3): 439-442. (in Chinese)
- Lindlöf B, Lindström E, Pehrson Å. 1974. Nutrient content in relation to food preferred by mountain hare. *The Journal of Wildlife Management*, **38** (4): 875-879.
- Lindlöf B, Pehrson Å, Johansson A. 1978. Summer food preference by penned mountain hares in relation to nutrient content. *The Journal of Wildlife Management*, **42** (4): 928-932.
- Lin G, Li W, Nevo E, Su J, Zhang T. 2011. Adaptive evolution of flaky thumb claw and elongated compulsory arousal duration in the subterranean rodent plateau zoker. *Ethology Ecology & Evolution*, **23** (1): 77-80.
- Lin G H, Xie J X, Cui X F, Nevo E, Su J P, Zhang T Z. 2012. Effects of supplemental dietary tannic acid on digestion in plateau zokors (*Eospalax baileyi*). *Annales Zoologici Fennici*, **49** (5): 371-377.
- Lin G H, Xie J X, Su J P, Zhang T Z. 2010. Weight allocation of limb long bones of four small mammal species. *Sichuan Journal of Zoology*, **29** (5): 622-625. (in Chinese)
- Moss R. 1991. Diet selection: an ecological perspective. *Proceedings of the Nutrition Society*, **50** (1): 71-75.
- Nevo E, Beiles A, Spradling T. 1999. Molecular evolution of cytochrome *b* of subterranean mole rats, *Spalax ehrenbergi* Superspecies, in Israel. *Journal of Molecular Evolution*, **49** (2): 215-226.
- Nolte D L, Provenza F D. 1992. Food preferences in lambs after exposure to flavors in milk. *Applied Animal Behaviour Science*, **32** (4): 381-389.
- Pehrson A, Lindlöf B. 1984. Impact of winter nutrition on reproduction in captive mountain hares (*Lepus timidus*) (Mammalia: Lagomor-

- pha). *Journal of Zoology*, **204** (2): 201–209.
- Perry G, Pianka E R. 1997. Animal foraging: past, present and future. *Trends in Ecology & Evolution*, **12** (9): 360–364.
- Provenza F D, Villalba J J, Dziba L E, Atwood S B, Banner R E. 2003. Linking herbivore experience, varied diets, and plant biochemical diversity. *Small Ruminant Research*, **49** (3): 257–274.
- Provenza F D, Scott C B, Phy T S, Lynch J J. 1996. Preference of sheep for foods varying in flavors and nutrients. *Journal of Animal Science*, **74** (10): 2355–2361.
- Pyke G H, Pulliam H R, Charnov E L. 1977. Optimal foraging: a selective review of theory and tests. *Quarterly Review of Biology*, **52**: 137–154.
- Pyke G H. 1984. Optimal foraging theory: a critical review. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **15**: 523–575.
- Qin C, Huang K, Xu H. 2002. Isolation and characterization of a novel polysaccharide from the mucus of the loach, *Misgurnus anguillicaudatus*. *Carbohydrate Polymers*, **49** (3): 367–371.
- Rogers P J, Blundell J E. 1991. Mechanisms of diet selection: the translation of needs into behaviour. *In Proc Nut Soc*, **50** (1): 65–70.
- Savage R E. 1931. The relation between the feeding of the herring off the east coast of England and the plankton of the surrounding waters. *Fishery Investigations*, **12** (3).
- Secombe-Hett P, Turkington R. 2008. Summer diet selection of snowshoe hares: a test of nutritional hypotheses. *Oikos*, **117** (12): 1874–1884.
- Shi M, Xiao J T, Li S T, Hong Y. 1997. Effect of dietary protein levels on brain development and function in rats progeny. *Acta Nutrimenta Sinica*, **19** (4): 405–410. (in Chinese)
- Su J P, Liu J K. 2000. Overwinter of small herbivorous mammals inhabiting alpine area. *Acta Theriologica Sinica*, **20** (3): 186–192. (in Chinese)
- Tang Z M, Zhao F J, Kong S N, Su C Q, Zheng J S, Que N N. 1993. Effect of protrin deficiency on macrophages of mice. *Acta Nutrimenta Sinica*, **15** (4): 397–401. (in Chinese)
- Wang B, Chen J. 2012. Effects of fat and protein levels on foraging preferences of tannin in scatter-hoarding rodents. *PloS ONE*, **7** (7): e40640.
- Wang J Y, Zhu S G, Xu C F. 2002. *Biochemistry (the third edition) (Volume I)*. Beijing: Higher Education Press, 1–75. (in Chinese)
- Wang Q Y, Zhang Y M, Wei W H, Bian J H. 2000. Food habit of the plateau zokor. *Acta Theriologica Sinica*, **20** (3): 193–199. (in Chinese)
- Xie J X, Lin G H, Liu C X, Yang C H, Deng X G, Cui X F, Li B, Zhang T Z, Su J P. 2013. Diet selection in overwinter caches of plateau zokor (*Eospalax baileyi*). *Acta Theriologica*, DOI 10.1007/s13364-013-0168-3 (online).
- Yang C H, Du Y R, Xie J X, Cui X F, Su J P, Zhang T Z. 2012. Morphological differences of internal organs in two species of zokor and their significance in classification. *Acta Theriologica Sinica*, **32** (3): 259–265. (in Chinese)
- Zhang Y J, Wang S J, Guo A W, Chen F F, Cui L W, Xiao W. 2013. Spring food selection by *Rhinopithecus bieti* at Mt. Lasha in relation to phytochemical components. *Zoological Research*, **34** (3): 152–159. (in Chinese)
- Zhang Y M. 2000. Studies on the pattern of animal-plant interaction: the effects of plateau zokor on the biogeochemical cycling of alpine meadow ecosystem and its response to the chemical defense of plants. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences. (in Chinese)
- Zhang Y M, Zhang Z B, Liu J K. 2003. Burrowing rodents as ecosystem engineers: the ecology and management of plateau zokors *Myospalax fontanieri* in alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Mammal Review*, **33** (3–4): 284–294.
- Zhou W Y, Dou F M. 1990. Studies on activity and home range of plateau zokor. *Acta Theriologica Sinica*, **10** (1): 31–39. (in Chinese)
- 王权业, 张堰铭, 魏万红, 边疆晖. 2000. 高原鼢鼠食性的研究. *兽类学报*, **20** (3): 193–199.
- 王镜岩, 朱圣庚, 徐长法. 2002. *生物化学 (第三版) (上册)*. 北京: 高等教育出版社, 1–75.
- 林恭华, 谢久祥, 苏建平, 张同作. 2010. 四种小哺乳动物四肢长骨重量配置分析. *四川动物*, **29** (5): 622–625.
- 苏建平, 刘季科. 2000. 高寒地区植食性小哺乳动物的越冬对策. *兽类学报*, **20** (3): 186–192.
- 李俊年, 刘季科. 2003. 植食性哺乳动物食物选择的生态学意义及行为机制. *应用生态学报*, **14** (3): 439–442.
- 杨传华, 都玉蓉, 谢久祥, 崔雪峰, 苏建平, 张同作. 2012. 两种鼢鼠内脏器官形态差异及其分类学意义. *兽类学报*, **32** (3): 259–265.
- 张堰铭. 2000. 动物与植物相互作用格局的研究: 高原鼢鼠对高寒草甸生态系统生物地球化学循环的作用及其对植物化学防卫应答的反应. 北京: 中国科学院研究生院.
- 张颖俊, 王双金, 郭爱伟, 陈粉粉, 崔亮伟, 肖文. 2013. 拉沙山黑白仰鼻猴春季食物化学成分及其对食物选择的影响. *动物学研究*, **34** (3): 152–159.
- 周文扬, 窦丰满. 1990. 高原鼢鼠活动与巢区的初步研究. *兽类学报*, **10** (1): 31–39.
- 施明, 肖锦腾, 李树田, 洪燕. 1997. 蛋白质水平对大鼠子代脑发育及功能的影响. *营养学报*, **19** (4): 405–410.
- 唐祖明, 赵凤举, 孔三囡, 苏长青, 郑纪山, 阙宁宁. 1993. 蛋白质缺乏对小鼠腹腔巨噬细胞的影响. *营养学报*, **15** (4): 397–401.
- 樊乃昌, 谷守勤. 1981. 中华鼢鼠 (*Myospalax fontanieri*) 的隧道结构. *兽类学报*, **1** (1): 67–71.
- 樊乃昌, 施银柱. 1982. 中国鼢鼠 (*Eospalax*) 亚属分类研究. *兽类学报*, **2** (2): 183–196.